

# Alternativa para el tratamiento de efluentes de la Escuela Superior de Ingeniería Textil (ESIT-IPN) mediante fitorremediación

Velasco Vite Juan Carlos\*, Contreras Contreras Ricardo

Instituto Politécnico Nacional. Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura. Unidad Zacatenco. Sección de Estudios de Posgrado e Investigación. Av. Miguel Bernard s/n, Edificio de Posgrado e Investigación. Unidad Profesional "Adolfo López Mateos", col. Zacatenco, Alcaldía Gustavo A. Madero, C.P. 07738, Ciudad de México.

\*Autor para correspondencia: [carvvite@gmail.com](mailto:carvvite@gmail.com)

## Recibido:

16/julio/2019

## Aceptado:

20/octubre/2019

## Palabras clave:

Fitorremediación,  
efluentes,  
color

## Keywords:

Phytoremediation,  
effluents,  
color

## RESUMEN

Los procesos textiles generan efluentes que contienen diversos contaminantes tales como colorantes, pigmentos, sales, etc. De acuerdo con la norma PROY-NOM-001-SEMARNAT-2017, se debe eliminar el 85 % de coloración del efluente antes de descargarlo al drenaje. La fitorremediación utiliza especies vegetales para remover, degradar o inmovilizar contaminantes en suelo y agua, y además funciona como alternativa para tratar efluentes textiles con menor costo e impacto ambiental que los procedimientos convencionales. En esta investigación se diseñaron y construyeron reactores para evaluar y comparar la remoción del color en los efluentes de los procesos de teñido practicados en ESIT-IPN, empleando las especies vegetales *Phragmites australis* y *Eichhornia crassipes*, conocidas como lirio acuático y carrizo común respectivamente. El carrizo registró mayores eficiencias de remoción (80 – 90 %), aunque el lirio también ofreció resultados aceptables (60 – 80%) y una alta tolerancia a los efluentes textiles. Este trabajo demuestra que la fitorremediación es una alternativa viable para el tratamiento de aguas pigmentadas, con costos reducidos de implementación-operación.

## ABSTRACT

Textile processes generate effluents with a variety of contaminants such as wastes of textile dyes, pigments, and etcetera. In accordance with standard PROY-NOM-001-SEMARNAT-2017 it has to be eliminated 85 % of the effluent color before of being discharged to the drain. Phytoremediation uses plant species to remove, degrade or immobilize contaminants from soil or water and also it's an alternative to treat textile effluents with a lower cost and reduced environmental impact than conventional treatments. In this investigation reactors was built to evaluate and compare the removal of the color from the effluents of the dyeing process carried out in ESIT-IPN using the plant species *Phragmites australis* and *Eichhornia crassipes* known as water lily and common reed respectively. It was observed a higher capacity of removal in the reed (80 – 90 %), however, *Eichhornia crassipes* gave acceptable results (60 – 80%) and a high tolerance to the dyed effluents. This work demonstrate that phytoremediation is a feasible alternative to treat textile effluents.

## Introducción

Las actividades industriales como la aplicación del color textil, la extracción del aceite de oliva o la manufactura de pulpa y papel, se caracterizan por sus altos consumos de agua y el empleo intensivo de colorantes, lo que ocasiona la liberación de grandes cantidades de efluentes pigmentados al medio ambiente (Dias et al., 2007). En general, las industrias textiles utilizan productos de composición química variada, que van desde simples componentes inorgánicos hasta polímeros y productos orgánicos (Robinson et al., 2001). Como consecuencia de sus actividades, tales industrias liberan al ambiente, diariamente, millones de litros de efluentes contaminados (Kabra et al., 2011). Tales descargas pueden contener colorantes, pigmentos, surfactantes, grasas y aceites, metales, sulfatos, cloratos, entre otros; todos ellos afectan, en menor o mayor grado, la calidad del agua en los cuerpos receptores (Shehzadi et al., 2014).

Como señalamos, los procesos tradicionales de coloración textil generan gran cantidad de efluentes coloreados. Así, por ejemplo, se requieren alrededor de 100 litros de agua para procesar un Kg de colorante (Dias et al., 2007). Además, la eficiencia de los procesos de teñido no es absoluta; aproximadamente un 15% de los colorantes aplicados se desperdicia y se vierte directamente al efluente industrial (Dias et al., 2007; Kabra et al., 2011). Una industria textil típica genera entre 40 y 65 litros de agua residual por cada Kg de producción (Manu y Chaudhari, 2002). Se estima que en todo el mundo se descargan 280 000 toneladas de colorantes textiles cada año (Pereira y Alves, 2012), y alrededor del 9% de la cantidad total de colorantes producidos a nivel mundial se vierten directamente a las aguas residuales (O'Neill et al., 1999).

En el caso específico de México, se generan alrededor de 230 m<sup>3</sup>/s de aguas residuales, de los cuales, reciben tratamiento sólo el 57%; en primera instancia, esto indica que se requiere de mayor infraestructura y recursos humanos capacitados para revertir la contaminación del recurso hídrico. Aunque ciertamente, el contexto ecológico, económico y cultural es más complejo; urgen propuestas innovadoras que permitan la implementación del tratamiento en diferentes condiciones ambientales y socioeconómicas (CNA, 2017).

Entre las soluciones más atractivas para el problema planteado, se encuentran los tratamientos que emulan los fenómenos que ocurren de manera espontánea en la naturaleza, denominados tratamientos naturales de aguas residuales. Éstos producen efluentes de buena calidad, al tiempo que implican bajos costos de inversión, operación y mantenimiento (Arias y Brix, 2003).

La fitorremediación ha demostrado ser uno de los procesos naturales de tratamiento más efectivos. Esta alternativa utiliza especies vegetales para remover, reducir, degradar o inmovilizar diversos contaminantes del suelo y el agua.

La propuesta de este trabajo es generar e implementar un tratamiento efectivo, con bajo impacto ambiental y costos reducidos para retirar los residuos de colorantes de los efluentes generados en la Escuela Superior de Ingeniería Textil.

## Metodología

El trabajo experimental inició con la recolección, adaptación y reproducción de las especies vegetales lirio acuático (*Eichhornia crassipes*) y carrizo común (*Phragmites australis*). Posteriormente, se preparó el material para el lecho filtrante, constituido por grava fina (3–5 mm). Una vez dispuesto el material, se procedió a la construcción de los sistemas experimentales, donde se trataron efluentes con diversos colorantes provenientes de los procesos de teñido practicados en la ESIT.

Finalmente, las muestras tratadas se sometieron a diversos análisis de laboratorio para evaluar la capacidad de remoción en cada sistema y con cada colorante utilizado.

## Recolección de especies vegetales

Se seleccionó la especie *Eichhornia crassipes* para el tratamiento de flujo superficial, pues ha demostrado ser muy efectiva en el tratamiento de metales pesados, compuestos orgánicos y colorantes (Guevara y Ramírez, 2015); además, dado su carácter invasivo, es ampliamente aprovechada en procesos de fitorremediación. Los ejemplares utilizados en esta experimentación fueron recolectados en el llamado Canal Nacional, ubicado en el límite entre las alcaldías Xochimilco y Tlalpan, CDMX.

Para el flujo subsuperficial se usó la especie *Phragmites australis*, ya que posee excelente capacidad de adaptación a diversas condiciones ambientales; es utilizada en humedales artificiales por su tolerancia a condiciones salinas y altos niveles de DQO; ofrece pocas exigencias de mantenimiento y una baja susceptibilidad a accidentes, plagas y enfermedades.

Además, suministra oxígeno de manera directa a los microorganismos circundantes; de hecho, cuando éste se libera en las raíces, se crean en torno micrositios oxidantes. Los ejemplares de *Phragmites australis* fueron extraídos de la localidad de Huitznopala, municipio de Lolotla, Estado de Hidalgo.

### **Adaptación y reproducción de las especies vegetales**

Se construyó un invernadero para brindar a las plantas protección contra factores ambientales como la lluvia, el viento y el frío, y lograr así un mayor control durante la experimentación. Las especies vegetales tardaron entre 3 y 4 meses en adaptarse exitosamente, desde el momento de su extracción hasta el momento en que se observaron cambios fisiológicos importantes, como la reproducción de ambas especies y el veloz crecimiento de los nuevos individuos.

### **Extracción del soporte para el lecho filtrante**

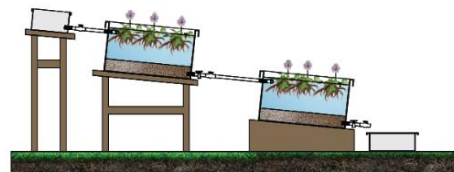
Se sabe que las características físicas y químicas del soporte influyen directamente en el tratamiento, por lo que su selección debe garantizar ciertos requerimientos necesarios, como la resistencia al desgaste provocado por las aguas residuales, proporcionar sitios para el almacenamiento de los contaminantes removidos y suministrar un área superficial para la fijación de microorganismos. Se utilizó un suelo grueso como lecho filtrante, consistente en un material natural de gravas finas limpias pobremente graduadas (GP), de acuerdo con la clasificación del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS). Su curva granulométrica demostró estar dentro del rango recomendado (Gauss et al., 2004). Sus principales características fueron: diámetro por el que pasa un 10% del suelo ( $D_{10}$ ) = 3.4; diámetro por el que pasa un 30% del suelo ( $D_{30}$ ) = 5.1; diámetro por el que pasa un 60% del suelo ( $D_{60}$ ) = 6.8; Coeficiente de uniformidad ( $C_u$ ) = 2; Coeficiente de curvatura ( $C_c$ ) = 1.125 y porosidad del 30–35%, lo cual brindó al soporte una excelente capacidad de drenaje. Para la extracción del soporte se cribó una masa de suelo por varias mallas hasta conseguir el diámetro requerido (3 – 5 mm); posteriormente, se lavaron a conciencia las partículas para eliminar el exceso de material fino.

### **Construcción de sistemas experimentales**

Los reactores se alojaron en contenedores rectangulares de plástico con las siguientes dimensiones: 50X30X35 cm. Para cada sistema, se emplearon dos contenedores conectados en serie con tubería de PVC y con una pendiente del 15%, para que el flujo circulara por gravedad.

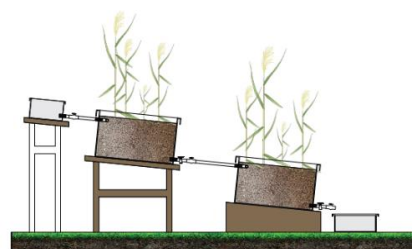
También se utilizó un contenedor adicional como medio de control, con las mismas características del sistema, pero sin contener ninguna especie vegetal. La macrófita seleccionada para el primer reactor (figura 1), *Eichhornia crassipes*, al ser una especie flotante, mantiene la mayor parte de su estructura en contacto directo con el agua y no requiere medio alguno de soporte para desarrollarse; no obstante, en el sistema se incluyó un medio de soporte compuesto por gravas finas y con un espesor de 5 cm, con

el fin de facilitar la fijación y desarrollo de los microorganismos propios de un sistema acuático.



**Figura 1.** Sistema de *Eichhornia crassipes* —lirio acuático— y su medio de control (elaboración propia).

La macrófita empleada en el segundo reactor (figura 2) fue el carrizo común, *Phragmites australis*; esta especie sí requiere de un medio de soporte para desarrollar su rizósfera y soportar su estructura aérea; dado que estas plantas alcanzan grandes tallas, se consideró necesario un espesor de soporte de 30 cm, constituido por gravas finas.



**Figura 2.** Sistema de *Phragmites australis* —carrizo común— y su medio de control (elaboración propia).

Como puede observarse en las figuras 1 y 2, la tubería instalada en ambos sistemas permitió que el flujo fuera del tipo laminar, tal como sugiere la bibliografía consultada.

### **Descripción general de la experimentación**

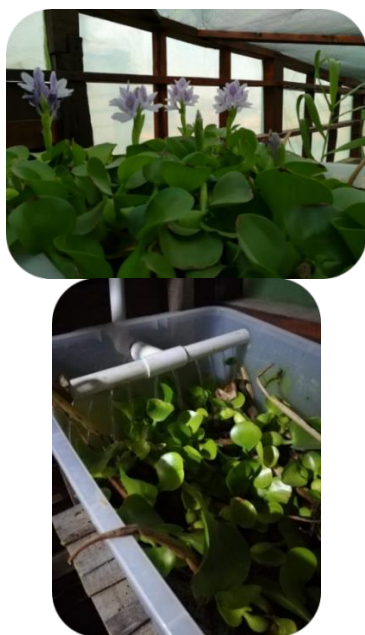
Según la Agencia de Protección del Medio Ambiente (EPA, 1988), el TRH ideal en los humedales artificiales oscila entre los 6 y 7 días (Arias y Brix, 2003; Ayala y González, 2008, Haiming et al., 2014). Asimismo, se recomienda un



TRH de 5 a 30 días para humedales a flujo libre y mayor de 5 días para humedales a flujo subsuperficial. Siguiendo los criterios anteriores y tomando en cuenta el hecho de que los efluentes generados en la ESIT son semanales, se consideró un TRH de 7 días en cada reactor experimental.

Para el suministro de los efluentes a los reactores se siguió la recomendación de experimentaciones realizadas previamente (Davies et al., 2005; Khandare et al., 2011; Núñez et al., 2007; Saeed y Sun, 2013; Sivakumar et al., 2013; Watharkar et al., 2012) donde el suministro del efluente con colorante se efectuó de manera gradual (primero en poca cantidad) para observar el comportamiento de las plantas y permitir que se adaptaran a las condiciones del efluente. Así, se realizaron 5 fases experimentales. En la 1ª, se suministraron 125 ml de efluente; en la 2ª, se duplicó la cantidad de efluente hasta 250 ml; y en la 3ª, 4ª y 5ª fases se suministraron 500 ml de efluente. Por supuesto, el efluente sometido a tratamiento en cada sistema y durante cada fase fue siempre de igual naturaleza y concentración, con el fin de obtener resultados controlados y comparables.

Los efluentes tratados contenían diversos tipos de colorante, según eran utilizados en las prácticas de laboratorio de la ESIT durante el periodo de experimentación. No obstante, se cuidó que cada efluente contuviera un único tipo de colorante, cada uno con naturaleza variada. Podemos observar algunos momentos de la experimentación en las figuras 3 y 4 con el lirio y en las figuras 5, 6 y 7 con el carrizo.



**Figuras 3 y 4.** Experimentación en los reactores con la especie *Eichhornia crassipes* —lirio acuático— (fotos propias).



**Figuras 5, 6 y 7.** Experimentación en los reactores con la especie *Phragmites australis* —carrizo común— (fotos propias).

### Pruebas de laboratorio

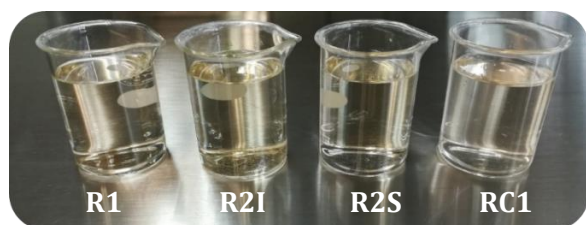
Todas las muestras de los efluentes pigmentados, así como las resultantes de la experimentación, se analizaron en laboratorio. Se realizaron pruebas de diversos parámetros fisicoquímicos antes y después de cada tratamiento con la finalidad de conocer el porcentaje de remoción en los sistemas de humedales. Las pruebas de color consistieron en una filtración para determinar el color verdadero con el matraz Kitasato, embudo Büchner y filtros de nitrocelulosa de 0.45 µm. La DBO<sub>5</sub> se determinó con el equipo DBO TrackTM. Para la DQO usamos el equipo DRB200. La conductividad, los sólidos suspendidos, los sólidos disueltos, la turbidez y el pH se determinaron con un potenciómetro.

## Resultados y discusión

Los resultados fueron diferentes en cada experimentación debido a varios factores como son la naturaleza del efluente con colorante, la especie vegetal, etc. También se observó una gran diferencia en los reactores control ya que, al no contener especie vegetal su capacidad de remoción fue mínima respecto a los sistemas que sí contenían.

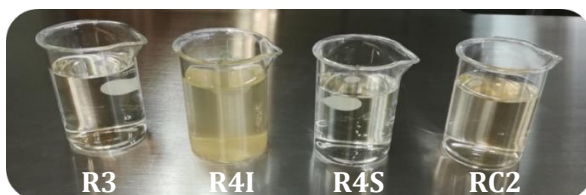
### Resultados 1° experimentación

Las muestras tratadas en la primera experimentación en el sistema con la especie *Eichhornia crassipes*, se muestran en la figura 8: R1) reactor 1; R2I) reactor 2, parte inferior; R2S) reactor 2, parte superior; RC1) reactor control del sistema.



**Figura 8.** Muestras de la 1° experimentación en los reactores con la especie *Eichhornia crassipes* (foto propia).

Las muestras de la primera experimentación en el sistema de *Phragmites australis*, se muestran en la figura 9: R3) reactor 3; R4I) reactor 4 en la parte inferior; R4S) reactor 4 en la parte superior y RC2) reactor control del sistema.



**Figura 9.** Muestras de la 1° experimentación en los reactores con la especie *Phragmites australis* (foto propia).

Se puede apreciar el porcentaje de remoción de la primera experimentación en la Tabla 1, las abreviaturas de la columna azul hacen referencia a características del experimento y los parámetros evaluados en laboratorio, de esta manera tenemos que M es la cantidad de muestra del efluente textil suministrado a los reactores; E se refiere a la especie vegetal: *Eichhornia crassipes* o *Phragmites australis*; UE son las unidades experimentales de acuerdo a la especie vegetal, para *Eichhornia crassipes* tenemos el reactor 1 (R1), el reactor 2 (R2) y su reactor control (RC1) y para *Phragmites australis* tenemos el reactor 3 (R3), el reactor 4 (R4) y su reactor control (RC2); pH es potencial hidrógeno; T es la turbidez (FAU); CV es color verdadero (Pt-Co); SDT son

los sólidos disueltos totales (ppm); SS son los sólidos suspendidos (mg/L); DBO<sub>5</sub> es la Demanda Biológica de Oxígeno (mg/L); DQO es la Demanda Química de Oxígeno (mg/L); CE es la conductividad eléctrica (mS).

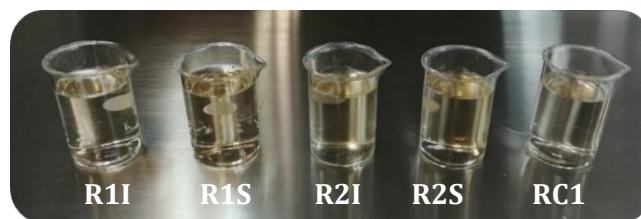
**Tabla 1.** Porcentaje de remoción en la 1° experimentación.

M	125 ml de efluente con colorante verde reactivo 19					
E	<i>Eichhornia crassipes</i>			<i>Phragmites australis</i>		
UE	R1	R2	RC1	R3	R4	RC2
Ph	15.84	19.35	16.13	17.17	30.17	16.22
T	13.98	9.68	-966.67	58.06	-77.42	-19.35
CV	96.24	-8.92	-6.42	83.57	82.86	19.25
SDT	-268.63	-641.18	-190.20	-167.65	-207.35	-152.94
SS	81.98	92.79	-245.95	86.49	90.54	67.57
DBO <sub>5</sub>	-----	-28.00	-----	-----	74.40	-----
DQO	-285.19	-951.85	-344.44	83.33	-161.11	-11.11
CE	-169.66	-461.80	-121.72	-104.49	-134.83	-86.52

Fuente: elaboración propia

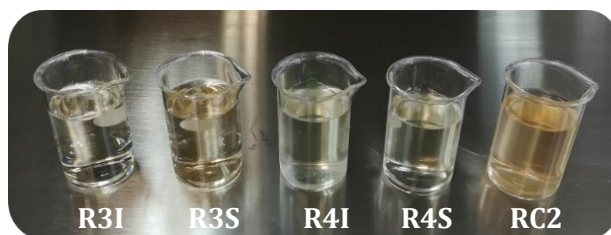
### Resultados 2° experimentación

Las muestras de la segunda experimentación en el sistema con *Eichhornia crassipes* aparecen en la figura 10: R1I) reactor 1 parte inferior; R1S) reactor 1 parte superior; R2I) reactor 2 parte inferior; R2S) Reactor 2 parte superior, y RC1) reactor control del sistema.



**Figura 10.** Muestras de la 2° experimentación en los reactores con la especie *Eichhornia crassipes* (foto propia).

Las muestras de la segunda experimentación en el sistema con la especie *Phragmites australis*, componen la figura 11: R3I) reactor 3 nivel inferior; R3S) reactor 3 nivel superior; R4I) reactor 4 nivel inferior; R4S) reactor 4 nivel superior y RC2) reactor control del sistema.



**Figura 11.** Muestras de la 2° experimentación en los reactores con la especie *Phragmites australis* (foto propia).



En la tabla 2, se muestran los resultados de la segunda experimentación considerando el mismo criterio que la tabla 1.

**Tabla 2.** Porcentaje de remoción en la 2ª experimentación.

M	250 ml de efluente con colorante rojo ácido 151					
E	<i>Eichhornia crassipes</i>			<i>Phragmites australis</i>		
UE	R1	R2	RC1	R3	R4	RC2
Ph	16.44	13.89	2.78	9.61	7.22	3.33
T	82.80	79.03	84.95	94.96	51.61	91.53
CV	55.50	53.90	7.09	81.05	51.33	16.36
SDT	-361.11	-413.89	-355.56	-127.08	-152.08	-91.67
SS	-61.90	-147.62	-52.38	71.43	-903.57	57.14
DBO <sub>5</sub>	-----	7.78	-----	-----	8.33	-----
DQO	-197.78	-92.59	61.48	65.00	2.78	82.22
CE	-361.11	-413.89	-355.56	-127.08	-150.00	-97.92

Fuente: elaboración propia

### Resultados 3ª experimentación

Las muestras del sistema de *Eichhornia crassipes* en la tercera experimentación según aparecen en la figura 12, fueron: R1I) reactor 1 parte inferior; R1S) reactor 1 parte superior; R2I) reactor 2 parte inferior; R2S) reactor 2 parte superior; RC1I) reactor control del sistema parte inferior, y RC1S) reactor control del sistema parte superior.



**Figura 12.** Muestras de la 3ª experimentación en los reactores con la especie *Eichhornia crassipes* (foto propia).

Las muestras de la tercera experimentación en el sistema con la especie *Phragmites australis*, aparecen en la figura 13: R3I) reactor 3 parte inferior; R3S) reactor 3 parte superior; R4I) Reactor 4 parte inferior; R4S) Reactor 4 parte superior; RC2I) reactor control del sistema parte inferior, y RC2S) reactor control del sistema parte superior.



**Figura 13.** Muestras de la 3ª experimentación en los reactores con la especie *Phragmites australis* (foto propia).

La tabla 3 consigna las mediciones y características durante la tercera experimentación siguiendo los criterios considerados previamente.

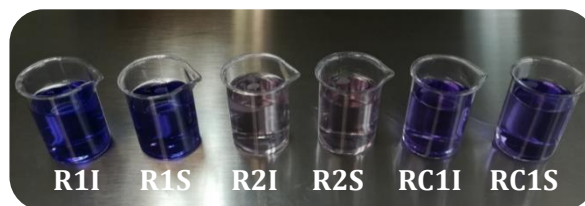
### Resultados 4ª experimentación

Considerando los criterios de las abreviaturas explicados con anterioridad, las muestras de la cuarta experimentación en el sistema con la especie *Eichhornia crassipes*, aparecen en la figura 14 y las muestras en el sistema con *Phragmites australis* aparecen en la figura 15. En la tabla 4 se observa el porcentaje de remoción durante esta experimentación.

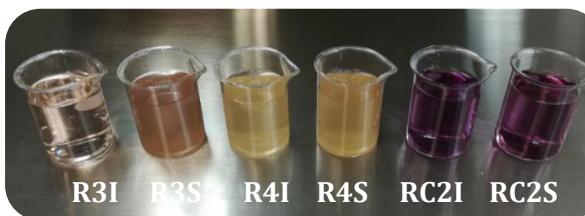
**Tabla 3.** Porcentaje de remoción en la 3ª experimentación.

M	500 ml de efluente con colorante violeta básico 3					
E	<i>Eichhornia crassipes</i>			<i>Phragmites australis</i>		
UE	R1	R2	RC1	R3	R4	RC2
Ph	19.47	21.23	12.11	19.37	30.15	15.24
T	54.51	70.72	29.54	85.10	79.80	61.57
CV	57.15	66.15	14.42	75.81	64.62	18.38
SDT	-208.05	-218.77	-168.20	-51.72	-45.98	-31.03
SS	64.91	73.10	52.63	94.74	79.82	73.25
DBO <sub>5</sub>	-----	22.51	-----	-----	70.09	-----
DQO	-252.49	90.80	-174.33	-43.68	-93.10	4.02
CE	-202.82	-215.63	-165.16	-49.44	-43.50	-27.68

Fuente: elaboración propia



**Figura 14.** Muestras de la 4ª experimentación en los reactores con la especie *Eichhornia crassipes* (foto propia).



**Figura 15.** Muestras de la 4ª experimentación en los reactores con la especie *Phragmites australis* (foto propia).

### Resultados 5ª experimentación

Los resultados de la quinta experimentación en el sistema con la especie *Eichhornia crassipes* se observan en la figura 16.



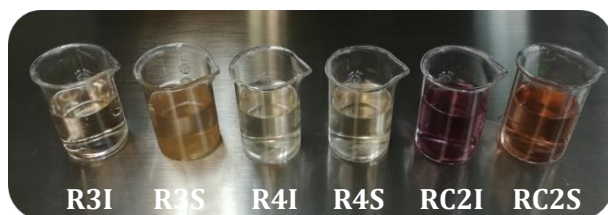
**Figura 16.** Muestras de la 5ª experimentación en los reactores con la especie *Eichhornia crassipes* (foto propia).

**Tabla 4.** Porcentaje de remoción en la 4ª experimentación.

M	500 ml de efluente con colorante azul directo 98					
E	<i>Eichhornia crassipes</i>			<i>Phragmites australis</i>		
UE	R1	R2	RC1	R3	R4	RC2
Ph	8.84	10.57	5.97	10.47	15.94	8.30
T	64.82	87.47	75.12	97.55	83.78	71.30
CV	60.82	74.46	19.93	87.65	37.87	21.71
SDT	-3477.78	-3966.67	-3166.67	-2083.33	-2550.00	-1583.33
SS	69.79	92.12	81.17	94.13	86.08	80.25
DBO <sub>5</sub>	-----	65.68	-----	-----	88.12	-----
DQO	92.59	75.41	86.96	87.33	83.67	91.44
CE	-3455.56	-3988.89	-3233.33	-2079.17	-2550.00	-1562.50

Fuente: elaboración propia

Los resultados de la quinta experimentación en el sistema con la especie *Phragmites australis* se observan en la figura 17.



**Figura 17.** Muestras de la 5ª experimentación en los reactores con la especie *Phragmites australis* (foto propia).

Finalmente, la tabla 5 muestra el porcentaje removido durante la quinta experimentación. Se observó la capacidad de las especies *Phragmites australis* y *Eichhornia crassipes* para remover el color de los efluentes textiles en niveles superiores al 50%. No obstante, los resultados de cada experimentación fueron diferentes debido a: (1) la naturaleza química de cada efluente y (2) la capacidad de remoción específica de cada sistema, dada por la especie vegetal utilizada y por los procesos aerobios o anaerobios suscitados en cada caso. Además, se tomaron dos muestras por colorante tratado en cada reactor: una en la parte inferior y otra en la superior.

**Tabla 5.** Porcentaje de remoción en la 5ª experimentación.

M	500 ml de efluente con colorante amarillo disperso 3					
E	<i>Eichhornia crassipes</i>			<i>Phragmites australis</i>		
UE	R1	R2	RC1	R4	R5	RC2
Ph	7.81	10.29	1.82	5.67	10.07	1.38
T	31.03	50.96	-56.32	78.45	77.87	49.43
CV	62.50	71.85	7.73	88.51	86.84	16.23
SDT	-6655.56	-7811.11	-5100.00	-4000.00	-5616.67	-2933.33
SS	-67.32	26.80	-169.28	92.16	88.24	47.06
DBO <sub>5</sub>	-----	73.39	-----	-----	87.40	-----
DQO	-427.20	-120.69	-1064.75	54.02	50.57	-443.68
CE	-4640.74	-5174.07	-3381.48	-2605.56	-3733.33	-1927.78

Fuente: elaboración propia

Al comparar nuestros resultados con la información disponible acerca del uso específico de la fitorremediación en el tratamiento de agua residual textil o de efluentes con colorantes en general, encontramos que se han empleado éstas y otras especies vegetales, cuyas eficiencias de remoción se muestran a continuación.

Davies et., al (2005), usaron un humedal a flujo vertical con la especie *Phragmites australis*, para la degradación del colorante azoico naranja ácido 7, con eficiencias de remoción de hasta 70% de color y 60% de DQO.

Mahmood et al., (2005), construyeron un reactor a nivel laboratorio, donde se experimentó con *Eichhornia crassipes* para tratar agua residual textil durante un TRH de 96 horas; se lograron eficiencias de remoción de pH de 56% y reducción de DBO y DQO entre 40 y 70%.

Rizwana et al., (2014), usaron *Eichhornia crassipes* para tratar agua residual de industrias textiles, con TRH de 96 horas; reportaron eficientes reducciones en las concentraciones de sólidos totales, pH y conductividad.

Saeed y Sun (2013), experimentaron con un sistema que integraba dos humedales artificiales: uno a flujo vertical y otro de flujo subsuperficial con soporte de arena sílica y bagazo de caña; utilizaron las especies *Phragmites australis*, *Dracaena sanderiana* y *Asplenium platyneuron* para tratar agua residual textil. Tras 15 semanas de experimentación, reportaron eficiencias de remoción de color de 61-79% para la parte sometida a flujo subsuperficial, y de 37-61% para el área con flujo vertical. Otros valores de remoción (para ambas secciones), fueron: DQO 60-90%; DBO 74-95%; turbidez 50-90%, y SST hasta 62%.

Sivakumar et al., (2013), usaron *Eichhornia crassipes* para tratar agua residual textil con un TRH de 15 días. La remoción de color fue baja al principio, pero después fue

aumentando hasta alcanzar valores entre 30 y 90%; parámetros como DBO, DQO y SDT, presentaron remociones de hasta 90%.

Si comparamos los datos anteriores con los resultados reportados en este trabajo, podemos afirmar que nuestra investigación fue exitosa, pues se alcanzaron porcentajes de remoción considerables, aunque disímiles, según la especie vegetal utilizada. En general, la fitorremediación de los efluentes de la ESIT contaminados con colorantes, arrojó mejores resultados en los experimentos efectuados con la especie *Phragmites australis*, con remociones de color de 50-85%; turbidez 70-85%; SST entre 55-94%; DBO de 74 a 88%, y DQO entre 60 y 90%. Por su parte, la especie *Eichhornia crassipes* mostró remociones de color de 50-75%; turbidez 48-75%; sólidos suspendidos 62-75%; DBO 66-73% y DQO del 72 al 93%. Sin embargo, y a pesar de que se logró una buena remoción de la coloración presente en los efluentes de la ESIT, no fue posible obtener un 100% de transparencia, debido principalmente a las sustancias húmicas generadas por las plantas empleadas en el tratamiento y (como se evidenció en el caso de los controles) al reciclaje de las sustancias removidas.

También es necesario señalar que el empleo de humedales artificiales para el tratamiento de efluentes contaminados con colorantes, promueve una alcalinización en el efluente tratado, lo cual, en términos comparativos, equivale el tratamiento químico convencional realizado en la ESIT para la remoción de color; no obstante, aunque con ambos procesos se alcanzan porcentajes de remoción similares (60-80%), la fitorremediación no consume reactivos químicos para su funcionamiento.

Por otro lado, resulta notable la alta tolerancia que ambas especies mostraron ante los efluentes textiles. Sin embargo, parámetros como la conductividad y los Sólidos Disueltos Totales (SDT), aumentaron considerablemente en ambos sistemas: ¡en algunos casos hasta 5 veces la concentración inicial! Esto sugiere que en los humedales deben ocurrir transformaciones fisicoquímicas que disparan los valores de tales parámetros. No existe bibliografía que explique a detalle este comportamiento, por lo que, de momento, podemos asociar el incremento de los SDT a la transformación de los SS, pues estos últimos consisten en partículas relativamente grandes que se transforman en partículas cada vez más pequeñas cuando se someten a tratamiento; esto se puede apreciar claramente en las experimentaciones donde hubo remociones de hasta 90% de SS, y a la par hubo un aumento de los SDT de hasta 40 veces la concentración inicial. En el mismo sentido, la conductividad es directamente proporcional a los SDT.

Cabe resaltar que en el sistema de *Phragmites australis*, los contaminantes comenzaron a precipitar en la superficie del medio de control, formando una capa delgada. Se investigó si el precipitado era únicamente superficial y se corroboró que sí, pues no se encontró a otras profundidades sino en zonas específicas en torno a la rizósfera, lo cual sugiere la existencia de una “rizofiltración” del contaminante en el sistema o la existencia de micrositios oxidantes que facilitan dicha precipitación en torno a las raíces.

Con respecto a los medios de control cabe destacar que, aun cuando existió una ligera remoción de ciertos componentes —principalmente por medios físicos—, ésta no fue comparable con las remociones observadas en los sistemas que sí contenían especies vegetales. Esto demuestra la importancia de las especies vegetales en los sistemas, pues su presencia trae aparejado el desarrollo de microorganismos involucrados en la degradación de la materia —proceso fundamental del tratamiento mediante humedales artificiales—, en tanto que, en ausencia de plantas, es difícil que dichos organismos proliferen.

## Conclusiones

Este trabajo demostró que es posible obtener una eficiente remoción del color de las aguas residuales provenientes de los procesos de teñido realizados en la ESIT, sin la necesidad de usar reactivos químicos adicionales. La evaluación del porcentaje de remoción del color de los efluentes de la ESIT —usando la fitorremediación basada en dos especies vegetales: *Eichhornia crassipes* y *Phragmites australis* —, mostró mejores resultados con la segunda especie, por lo que puede considerarse la más apta para implementar este tipo de sistemas. No obstante, en términos generales, ambas presentaron buena respuesta al suministro de los efluentes con colorantes; en consecuencia, dadas sus formas vegetativas disímiles, bien podrían complementarse en un humedal de tipo mixto.

Además de un mejor desempeño en la remoción del color, la especie *Phragmites australis* ofrece otras ventajas respecto a *Eichhornia crassipes*, tales como [una mayor tolerancia a la temperatura, crecimiento y reproducción más aceleradas, buen desarrollo de raíces y menor requerimiento de agua. Por otra parte, el tamaño de partícula del material empleado como sustrato resultó adecuado y propició una excelente filtración del efluente.

Los parámetros pH, SS, DQO y turbidez, disminuyeron sus concentraciones hasta niveles muy aceptables si se les compara con las experimentaciones llevadas a cabo por los autores consultados. No obstante, hay que tener en cuenta que los SDT y la conductividad aumentaron notablemente sus concentraciones finales, por lo que



sería necesario revertir esa tendencia en caso de una futura aplicación.

Como ya se mencionó, no se obtuvo un agua 100% cristalina de manera posterior al tratamiento, pues ambos sistemas de experimentación proporcionaron cierta coloración a los efluentes tratados, atribuible al humus generado por las especies vegetales. Por último, cabe señalar que la eficiencia de remoción de color en el sistema con *Eichhornia crassipes*, no cumple con el requerimiento establecido en la norma PROY-NOM-001-SEMARNAT-2017, la cual exige eliminar el 85% de color en los efluentes que sean descargados en cuerpos receptores. Para el caso del sistema basado en *Phragmites australis*, se alcanza apenas el límite porcentual establecido, por lo que sería deseable su perfeccionamiento. No obstante, en términos comparativos, ambos sistemas igualan las eficiencias de remoción de color alcanzadas mediante el tratamiento químico convencional llevado a cabo en la ESIT (60–80%), por lo que bien pueden considerarse como un método alternativo de tratamiento con bajo impacto ambiental y menores costos.

## Referencias

- Arias C. A., Brix H. (2003). Humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales. *Revista Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 13: 17 - 24
- Ayala R., González G. (2008). Apoyo didáctico en la enseñanza – aprendizaje de la asignatura de plantas de tratamiento de aguas residuales. Tesis de grado, Universidad de San Simón, Cochabamba, Bolivia.
- Comisión Nacional del Agua (CNA). (2017). Situación del subsector agua potable, alcantarillado y saneamiento.
- Davies L. C., Carias C. C., Novais J. M., Martins-Dias S. (2005). Phytoremediation of textile effluents containing azo dye by using *Phragmites australis* in a vertical flow intermittent feeding constructed wetland. *Ecological Engineering*, 25: 594-605.
- Dias A. A., Sampaio A., Bezerra R. M. (2007). Environmental applications of fungal and plant systems: decolourization of textile wastewater and related dyestuffs. En Singh S. N., Tripathi, R. D. (Ed.), *Environmental Bioremediation Technologies*, 1° Ed. Springer, p. 445 – 463.
- Environmental Protection Agency (EPA). (1988). Design manual. Constructed wetlands and aquatic plant systems for municipal wastewater treatment.
- Gauss M., Cáceres V., Fong N. (2004). Investigaciones y experiencias con biofiltros en Nicaragua y Centroamérica. Simposio Internacional de Tecnologías Alternativas en Agua y Saneamiento para Pequeñas Localidades llevada a cabo en Lima, Perú. Organización Panamericana de la Salud.
- Guevara M. F., Ramírez L. J. (2015). *Eichhornia crassipes*, su invasividad y potencial fitorremediador. *La Granja: Revista de Ciencias de la Vida*, 22 (2): 5-11.
- Haiming W., Jian Z., Huu N., Wenshan G., Zhen H., Shuang L., Jinlin F., Hai L. (2014). A review on the sustainability of constructed wetlands for wastewater treatment: Design and operation. *Bioresource Technology*, 175: 594-601.
- Kabra A. N., Khandare R. V., Waghmode T. R., Govindwar S. P. (2012). Phytoremediation of textile effluent and mixture of structurally different dyes by *Glandularia pulchella* (Sweet) Tronc. *Chemosphere*, 87: 265-272.
- Khandare R. V., Kabra A. N., Kurade M. B., Govindwar S. P. (2011). Phytoremediation potential of *Portulaca grandiflora* Hook. (Moss Rose) in degrading a sulfonated diazo reactive dye Navy Blue HE2R (Reactive Blue 172). *Bioresource Technology*, 102: 6774-6777.
- Mahmood Q., Zheng P., Islam E., Hayat Y., Hassan M. J., Jilani G., Jin R. C. (2005). Lab scale studies on water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) for biotreatment of textile wastewater. *Caspian Journal of Environmental Sciences*, 3 (2): 83-88.
- Manu B., Chaudhari S. (2002). Anaerobic decolourization of simulated textile wastewater containing azo dyes. *Bioresource Technology*, 82 (3): 225-231.
- Núñez R. A., Meas Y., Ortega R., Olguín E. J. (2004). Fitorremediación: fundamentos y aplicaciones. *Ciencia*, 55 (3): 69- 82.
- O'Neill C., Hawkes F. R., Hawkes D. L., Lourenço N. D., Pinheiro H. M., Delée, W. (1999). Colour in textile effluents – sources, measurement, discharge consents and simulation: a review. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 74: 1009 – 1018.
- Pereira L. R., Alves, M. S. (2012). Dyes – Environmental Impact and Remediation. En Malik, A., Grohmann, E. (Eds), *Environmental Protection Strategies for Sustainable Development. Strategies for Sustainability, India y Alemania: Springer*.
- Rizwana M., Darshan M., Nilesh D. (2014). Phytoremediation of textile waste water using potential wetland plant: eco sustainable approach. *International Journal of Interdisciplinary and Multidisciplinary Studies (IJIMS)*, 1 (4): 130-138.

Robinson T., McMullan G., Marchant R., Nigam P. (2001). Remediation of dyes in textile effluent: a critical review on current treatment technologies with a proposed alternative. *Bioresource Technology*, 77: 247-255.

Saeed T., Sun G. (2013). A lab-scale study of constructed wetlands with sugarcane bagasse and sand media for the treatment of textile wastewater. *Bioresource Technology*, 128: 438-447.

Shehzadi M., Afzal M., Umar M. K., Islam E., Mobin A., Anwar S., Mahmood Q. K. (2014). Enhanced degradation of textile effluent in constructed wetland system using *Typha domingensis* and textile effluent-degrading endophytic bacteria. *Water Research*, 58: 152-159.

Sivakumar D., Shankar D., Vijaya A., Valarmathi M. (2013). Constructed wetland treatment of textile industry wastewater using aquatic macrophytes. *International Journal of Environmental Sciences*, 3 (4): 1223-1232.

Watharkar A., Khandare R., Kamble A., Mulla A., Govindwar S., Jadhav J. (2012). Phytoremediation potential of *Petunia grandiflora* Juss, an ornamental plant to degrade a disperse, disulfonated triphenylmethane textile dye Brilliant Blue G. *Environmental Science and Pollution Research International*, 20 (2): 939-949.